

R&D12b

AMÉLIORATION DES MÉTHODES ET AMÉLIORATION DES
MARGES D'INCERTITUDE DES CALCULS DE PRODUCTIBLE EN
TERRAIN COMPLEXE

Maître d'ouvrage

ENCIS Environnement

Rédaction réalisée par :

Mathieu Bruneau

Marius Chaumier

Dans le cadre d'approfondissement du sujet R&D 12, ENCIS Environnement s'intéresse en détail aux méthodes CFD pour les sites complexes. Tout d'abord, une note bibliographique présente l'état de l'art concernant les méthodes CFD et leurs précisions. Ensuite deux logiciels, Meteodyn et WASP-CFD, sont testés sur un site complexe.


Structure		
Adresse	Siège : Parc ESTER Technopole 21 rue Columbia 87068 LIMOGES Antenne de Toulouse : 57 rue Bayard / 31000 Toulouse	
Téléphone	Siège : 05 55 36 28 39 Toulouse : 07 69 04 80 17	
Rédaction	Chaumier Marius, Assistant chargé d'études EnR Bruneau Mathieu, Responsable d'études EnR	MC MB
Correction	Cantegril Valérian, Responsable du pôle Energie/Climat	VC
Validation	Sylvain Le Roux, Directeur développement et innovation	SLR
Version	Janvier 2024	

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Sujet traité.....	6
1.2	Postulats et questions de départ à vérifier.....	6
2	Note bibliographique état de l'art	7
2.1	Présentation des méthodes classiques et CFD	8
2.1.1	Présentation des méthodes dites classiques	8
2.1.2	Présentation de la méthode CFD	10
2.2	Comparaison des méthodes WAsP classical, WAsP-CFD et Meteodyn WT	12
2.2.1	WAsP Classical et WAsP-CFD.....	12
2.2.2	WAsP Classical et CFD Meteodyn	13
2.3	Conclusion	15
3	Partie expérimentale - Comparaison WAsP, WAsP-CFD et Meteodyn	16
3.1	Méthodologie	17
3.1.1	Définition du terrain à l'étude.....	17
3.1.2	Logiciels utilisés et conditions de calculs	17
3.1.3	Calculs réalisés.....	17
3.2	Résultats	18
3.2.1	Vitesses de vent	18
3.2.2	Productible	19
3.3	Discussion et conclusion.....	20
4	Tableaux - Figures - Cartes	21
5	Bibliographie.....	23



1 Introduction



1.1 Sujet traité

Afin d'estimer la vitesse et la direction du vent à un endroit donné, et plus spécifiquement des productibles éoliens, il existe plusieurs méthodes utilisant des modèles d'écoulement différents. Nous nous intéressons ici aux méthodes qui prennent en données d'entrée des données de vent provenant de mâts de mesures installés pendant au moins une année complète.

Les autres données d'entrée sont généralement les données terrains :

- la rugosité : qui correspond aux obstacles du sol ; il s'agit le plus souvent d'arbres et d'habitations ;
- la topographie : qui correspond à la variation du relief.

D'après le guide MEASNET (2022) relative à l'évaluation des conditions de vent spécifiques à un site, un terrain est considéré comme complexe si des pentes de plus de 17° sont observables ou quand des séparations des flux peuvent se produire. Nous nous intéresserons ici à étudier l'impact de la complexité du terrain, sur la précision des extrapolations des données de vent et aussi le calcul de productible éolien.

Plusieurs logiciels proposent de réaliser l'extrapolation spatiale et le calcul de productible. Deux grandes méthodes semblent se démarquer :

- le modèle classique : qui extrapole les données de vent à une hauteur en utilisant les données terrains par secteur ;
- le modèle CFD : qui modélise l'écoulement du vent grâce à de puissants ordinateurs.

La seconde méthode a la réputation d'être plus précise mais demande des moyens de calculs plus importants (calculs réalisés sur un cluster d'ordinateurs via Cloud) et est souvent plus coûteuse.

1.2 Postulats et questions de départ à vérifier

Les questions posées afin d'améliorer la précision de nos études sur des sites pouvant être qualifiés de « complexes » sont :

- Quels sont les grandes différences entre les deux méthodes (classique et CFD) ?
- Quelle précision apporte la méthode CFD ?
- Dans quels cas l'usage du CFD est-il nécessaire ?
- Est-il possible avec l'un ou l'autre des modèles d'évaluer précisément les régimes de vent à quelques kilomètres d'un mât de mesures sur un terrain complexe ?



2 Note bibliographique état de l'art

2.1 Présentation des méthodes classiques et CFD

2.1.1 Présentation des méthodes dites classiques

Dans le cadre de l'étude du potentiel éolien, il existe des méthodes traditionnelles qui permettent d'extrapoler les données sans avoir à résoudre les équations d'écoulement de Navier-Stokes. Ces méthodes se basent sur des mesures de vent effectuées à une ou plusieurs hauteurs du mât, ainsi que sur une cartographie de la rugosité du site (utilisant des données telles que Corine Land Cover, globe cover, orthophotographie, etc.) [1]. Elles permettent de réaliser une extrapolation spatiale à la fois verticale et horizontale.

Ces méthodes d'extrapolation classiques sont largement utilisées, car elles offrent une approche pratique et efficace pour évaluer le potentiel éolien d'un site donné. Elles évitent la complexité des équations d'écoulement de Navier-Stokes, ce qui permet d'obtenir rapidement des estimations du comportement du vent dans la région étudiée.

2.1.1.1 Extrapolation Verticale

Dans le contexte de l'analyse du productible éolien, l'une des premières étapes cruciales est l'extrapolation verticale du vent. Cette étape est nécessaire en raison de la différence de hauteur entre le mât de mesure et le moyeu des éoliennes qui seront ultérieurement installées. En utilisant des mesures de vent effectuées à plusieurs hauteurs le long du mât, nous pouvons calculer la vitesse du vent, notée V , à la hauteur du moyeu. Pour ce faire, nous nous appuyons sur une loi qui tente de représenter le profil vertical du vent.

Dans l'industrie éolienne, deux lois sont largement utilisées à cet effet [2]. La première est la loi en puissance, qui est une approche empirique mais qui s'est avérée donner de bons résultats tout en restant très simple. La seconde est la loi en logarithme, qui découle de la théorie de la couche limite. Cette dernière loi a été développée dans le but de mieux représenter les caractéristiques du vent dans différentes strates de l'atmosphère.

Grâce aux mesures effectuées, il devient possible de calculer les paramètres qui permettent d'ajuster au mieux le profil mesuré à la loi choisie. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour extrapoler les données et ainsi obtenir des estimations précises du comportement du vent à la hauteur du moyeu des éoliennes envisagées.

2.1.1.2 Extrapolation Horizontale

L'extrapolation horizontale est une étape essentielle pour prendre en compte le fait que les éoliennes ne seront pas installées exactement à l'emplacement du mât de mesures, mais à quelques dizaines voire centaines de mètres de distance. Des logiciels spécialisés sont utilisés pour tenir compte de la topographie du site et modéliser localement les flux d'air autour du point de mesure.

Si les emplacements des éoliennes ne sont pas encore entièrement définis en fonction d'autres contraintes, cette étape permet également de tester différentes configurations pour le parc éolien. Ainsi, les éoliennes peuvent être placées dans les zones les plus ventées, tout en minimisant les effets de sillage entre elles.

L'un des logiciels les plus utilisés pour cette étape est WASP [2]. Ce logiciel utilise les caractéristiques de rugosité du terrain et les équations théoriques régissant le profil vertical du vent pour estimer le vent géostrophique au-dessus de la couche limite, à partir des mesures effectuées en un lieu précis et à une hauteur spécifique. Ensuite, le processus inverse permet d'obtenir le vent proche de la surface aux emplacements et hauteurs souhaités. Cependant, il convient de souligner que cette méthode présente des limites, notamment le fait que le site de mesure et le site étudié doivent être soumis au même régime de vent. Bien que WASP prenne en compte la rugosité, les obstacles et l'orographie, il ne tient compte d'aucun aspect non linéaire de l'écoulement du vent [2].

2.1.1.3 Limitation de WASP en terrain complexe

Comme décrit précédemment, WASP présente beaucoup d'avantages. C'est une méthode simple, peu gourmande en calcul et qui a prouvé son efficacité lors d'études de potentiel éolien. Cependant les méthodes telle que WASP ont du mal à décrire le flux d'air en terrain complexe. Une étude de la Technical University of Denmark s'est justement intéressée à l'influence de la topographie sur la précision des modèles telle que WASP [3].

L'indice de rugosité (RIX) d'un site donné mesure la quantité de terrain environnant qui est plus raide qu'une pente critique et sert à quantifier la complexité d'un terrain. En général, WASP fonctionne mieux lorsque le terrain est lisse, avec un RIX proche de zéro.

Dans cette étude, il a été examiné l'erreur de prédiction de la vitesse du vent par WASP en fonction des différences de complexité (mesurées par le RIX) entre différents sites. Pour mesurer le RIX d'un site, il faut calculer la proportion de segments représentant des pentes raides par rapport à l'ensemble des segments du site en question.

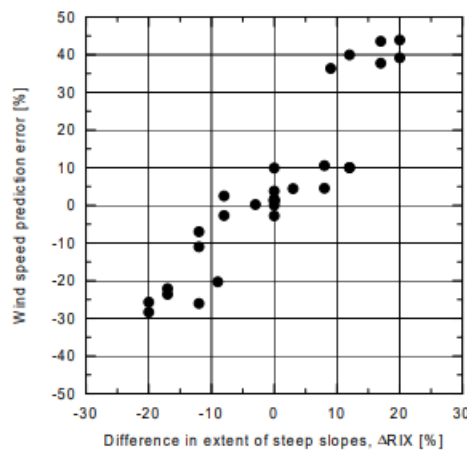


Figure 1 : Erreur de prédiction de la vitesse du vent WASP en fonction de la différence d'étendue des pentes raides (valeurs RIX) entre le site prédit et le site de référence. Les données de 5 sites portugais et de 2 sites sont présentées.

La figure 1 [3] représente l'erreur de prédiction en vitesse en fonction de la différence de complexité entre le site de mesure et le site sur lequel la vitesse de vent est prédite. On observe une forte influence de la différence de complexité entre les sites sur la prédiction de la vitesse de vent. Si le site de référence est complexe et que le site prédit est moins complexe ou plat, la prédiction globale est sous-estimée avec une erreur significative et négative. En revanche, si le site de référence est plat ou

moins complexe qu'un site prédit complexe, la prédiction globale est surestimée avec une erreur significative et positive.

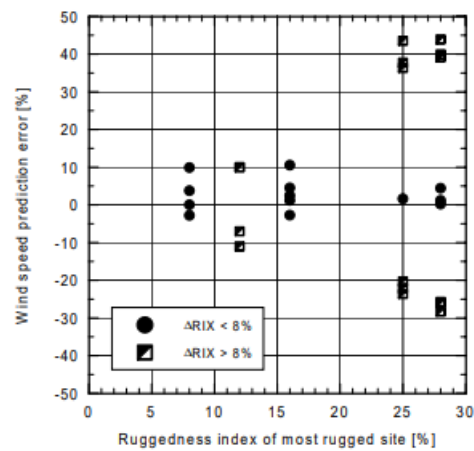


Figure 2 : Erreur de prévision de la vitesse du vent WASP en fonction de la différence d'étendue des pentes raides (valeurs RIX) du site prédicteur (référence) et du site prédit les plus accidentés.

La figure 2 [3] représente les mêmes données mais cette fois-ci on a représenté en abscisse le RIX du terrain le plus complexe entre le terrain de mesure et le terrain prédit et on a séparé les données en deux catégories, l'une pour $\Delta RIX \leq 8\%$ et l'autre pour $\Delta RIX \geq 8\%$.

On remarque qu'il est possible d'obtenir des prédictions précises de la vitesse de vent, même avec un terrain complexe, à condition que la différence d'indices RIX entre le site de référence et le site prédit soit faible. C'est évidemment le cas si le site prédit est identique au site sur lequel les mesures sont effectuées (auto-prédiction) mais cela peut également se produire pour des sites voisins ayant des configurations orographiques et une orientation similaire.

2.1.2 Présentation de la méthode CFD

2.1.2.1 Description générale

La Computational fluid dynamics (CFD) est une méthode de simulation numérique largement utilisée dans le domaine des études de potentiel éolien. Elle permet de modéliser et de prédire l'écoulement du vent autour des éoliennes et des structures environnantes en utilisant des modèles mathématiques complexes.

En utilisant des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie, la CFD tient compte de manière précise des effets de la turbulence, de la rugosité du sol et de la topographie locale, ce qui permet d'obtenir des résultats précis. Elle permet aussi de prendre en considération les interactions entre les éoliennes au sein des parcs éoliens, notamment les effets de sillage [4]

Cependant, la CFD présente certaines limites. Tout d'abord, son utilisation nécessite des ressources de calcul importantes, telles que des clusters d'ordinateurs puissants, ce qui peut entraîner des coûts élevés. De plus, la qualité des données d'entrée, notamment les données météorologiques et topographiques, joue un rôle crucial dans la précision des résultats obtenus. Des incertitudes peuvent

subsister quant aux modèles utilisés et aux paramètres sélectionnés, ce qui peut influencer les résultats obtenus par la CFD [5].

De plus dans le domaine de la simulation numérique en mécanique des fluides, il existe différentes méthodes de modélisation, notamment les simulations RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), LES (Large Eddy Simulation) et DNS (Direct Numerical Simulation). Chacune de ces méthodes présente des caractéristiques et des domaines d'application spécifiques.

Les simulations RANS sont les plus couramment utilisées en raison de leur efficacité et de leur capacité à traiter des écoulements turbulents complexes. Elles reposent sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps et spatialement. Les modèles de turbulence sont utilisés pour représenter les effets de la turbulence non résolue. Les simulations RANS permettent d'obtenir des résultats statistiques moyennés dans le temps, ce qui les rend appropriées pour des études d'écoulements moyens et de grande échelle. Cependant, elles présentent des limites dans la prédiction des caractéristiques détaillées de l'écoulement et peuvent sous-estimer les effets de la turbulence.

Les simulations LES sont une approche plus avancée qui vise à capturer les structures turbulentes de grande échelle. Elles permettent de résoudre directement les grandes structures turbulentes de l'écoulement, tandis que les petites structures sont modélisées à l'aide de sous-maillages. Les simulations LES sont particulièrement utiles pour les écoulements instationnaires et les interactions complexes entre les éoliennes et les structures environnantes. Elles fournissent des résultats plus détaillés que les simulations RANS, mais elles nécessitent également des ressources de calcul plus importantes en raison de la résolution fine des structures turbulentes.

Les simulations DNS sont les méthodes les plus précises, mais aussi les plus coûteuses en termes de ressources de calcul. Elles permettent de résoudre directement toutes les échelles de turbulence sans recourir à des modèles de sous-maillages. Cela permet d'obtenir des résultats très détaillés et précis, mais cela limite également l'applicabilité des simulations DNS à des cas d'écoulements simples et de petite échelle, en raison des contraintes de calcul associées à la résolution complète des équations de Navier-Stokes.

Dans le cadre d'étude de potentiel éolien, on utilise uniquement des simulations de type RANS et LES [6]. Les logiciels utilisés dans le cadre de cette étude, c'est-à-dire WindPro et Meteodyn, utilisent des modèles de type RANS.

2.1.2.2 Modèles de turbulence

Comme expliqué dans la section 2.1.2, les études éoliennes utilisent principalement des modèles de mécanique des fluides numérique (CFD) de type RANS. Ces modèles résolvent les équations de Navier-Stokes moyennées dans le temps et dans l'espace. Cependant, cette approche ne permet pas de caractériser les phénomènes turbulents de l'écoulement de manière précise. Par conséquent, il est nécessaire d'incorporer des modèles de turbulence pour estimer au mieux cette composante de l'écoulement. Le modèle à deux équations standard $k-\epsilon$ est le modèle utilisé dans l'industrie et largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie éolienne [7]. Ce modèle de turbulence présente toutefois des limites. Selon le papier publié en 2004 "Recommendations on the use of CFD in Wind Engineering" [5] il faut éviter le modèle $k-\epsilon$ standard au profit des modèles $k-\epsilon$ revisités tel que le modèle $k-\epsilon$ RNG ou encore $k-\epsilon$ réalisable qui donnent de meilleurs résultats. Le choix du modèle de turbulence doit également

dépendre du terrain, certains modèles présentant par exemple des performances différentes onshore et offshore [8]. Les logiciels de dynamique des fluides numérique (CFD) Meteodyn et WASP-CFD utilisent tous les deux des modèles de turbulence de type k- ϵ . Bien que la documentation ne spécifie pas quel modèle k- ϵ est utilisé, il convient de noter que l'étude citée date de 2004, ce qui laisse envisager que le modèle standard a pu être remplacé par des modèles plus avancés tels que le modèle k- ϵ RNG ou le modèle k- ϵ réalisable.

2.1.2.3 Limites de la CFD

L'utilisation de la Mécanique des Fluides Computationnelle (CFD) dans le domaine de l'ingénierie éolienne, connue sous le nom d'ingénierie éolienne computationnelle (CWE), a connu une augmentation significative au cours des deux dernières décennies. Malgré sa popularité croissante, cette approche est souvent perçue comme étant peu fiable pour les prédictions quantitatives et qualitatives, en raison de la multitude de paramètres physiques et numériques impliqués, qui peuvent être sélectionnés à la discrétion de l'utilisateur [5].

Cela signifie qu'il existe une certaine incertitude quant aux résultats obtenus par la CFD dans le domaine de l'ingénierie éolienne. Les utilisateurs ont la possibilité de choisir différents paramètres et modèles, ce qui peut influencer considérablement les résultats. Cette flexibilité peut être à la fois un avantage et un inconvénient, car elle permet d'adapter la simulation aux conditions spécifiques, mais elle introduit également un degré de subjectivité et une variabilité potentielle dans les résultats obtenus.

Il est important de reconnaître ces limitations lors de l'utilisation de la CFD en ingénierie éolienne. Des études et des validations supplémentaires sont nécessaires pour améliorer la confiance dans les résultats et réduire l'incertitude associée à cette approche. Une sélection judicieuse des paramètres, une calibration appropriée et une comparaison avec des données expérimentales peuvent contribuer à renforcer la fiabilité des prédictions obtenues par la CFD dans le domaine de l'ingénierie éolienne.

2.2 Comparaison des méthodes WASP classical, WASP-CFD et Meteodyn WT

2.2.1 WASP Classical et WASP-CFD

EMD International a réalisé une validation approfondie de WASP-CFD en utilisant plusieurs cas de test regroupés en cas "Classiques" et cas "Références" [9]. Les tests cherchant à caractériser l'augmentation de vitesse par rapport à la pente montrent que les augmentations de vitesse prédites par WASP-CFD sont cohérentes avec celles de WASP pour des inclinaisons de terrain faibles jusqu'à environ 5°. À des inclinaisons plus importantes, WASP surestime les augmentations de vitesse par rapport à WASP-CFD. On observe un maximum d'augmentation de vitesse pour WASP-CFD autour d'une pente de 20°, où WASP surestime l'augmentation de vitesse d'environ 15%.

Dans le cas de test sur le site Aveiro-Visieau, WASP présente des erreurs de prédiction allant jusqu'à 38%. En revanche, WASP-CFD réduit ces erreurs à moins de 9%.

Dans le cas de test sur la colline d'Askervein, WASP-CFD reproduit de manière significativement meilleure les augmentations de vitesse par rapport à WASP. Les erreurs quadratiques moyennes sont réduites d'un tiers le long de la tranche horizontale et pour le profil vertical au sommet de la colline. Les

facteurs d'augmentation de vitesse du côté sous le vent de la colline et les plus proches du sol sont particulièrement bien prédits par WASP-CFD.

Pour les six cas de référence, des prédictions croisées ont été effectuées entre les mâts de chaque site. En utilisant uniquement les anémomètres supérieurs, qui ont la meilleure qualité de données, les résultats montrent une réduction significative et très cohérente des erreurs de prédiction de $0,31 \pm 0,04$ m/s pour WASP-CFD par rapport à WASP. En moyenne, cela représente une réduction des erreurs de prédiction de $4,0 \pm 0,5\%$ sur la vitesse moyenne du vent ou de 6 à 8% sur la production annuelle d'énergie. En utilisant des mesures à des hauteurs plus basses, les résultats de WASP-CFD montrent également une amélioration cohérente mais plus faible par rapport à WASP. Les performances de WASP-CFD montrent une dépendance mineure à la configuration des tuiles (ou dalles) de 2x2km. Les résultats de la CFD seront légèrement plus performants si les éoliennes et le mât de mesure se trouve proche du centre de la dalle, là où le maillage sera plus fin.

Les résultats de validation démontrent que dans un terrain complexe, WASP-CFD représente une amélioration significative par rapport à WASP.

WASP-CFD réduit les erreurs de prédiction sur la vitesse moyenne du vent de 4% par rapport à WASP, ce qui se traduit par une réduction d'erreur de 6 à 8% sur les prévisions de production annuelle d'énergie.

2.2.2 WASP Classical et CFD Meteodyn

Des comparatifs entre la méthode WASP et le logiciel Meteodyn ont déjà été réalisés par plusieurs entreprises tels que EDF renouvelables, Hatch, ou encore Megajoule.

Dans le cas de Hatch, un test a été mené sur un site d'environ 88 km² équipé de 12 mâts [10]. Ce site est qualifié de complexe et présente de fortes variations de topographies (vallées, crêtes, montagnes, col, etc.), une diversité de massifs forestiers (diversité de hauteur, de densité, etc.), de fortes variations de RIX ($\geq 30\%$). La simulation sur Meteodyn a été effectuée avec une résolution horizontale de 30 m et une résolution verticale de 5 m avec le modèle « Robust forest ». Les calculs ont été effectués avec douze directions de vent pour une classe de stabilité thermique neutre (Classe 2). Les erreurs par rapport aux mesures sont alors comparées grâce aux matrices de confusion obtenues. Ce sont des matrices utilisées dans le domaine des statistiques ou de l'apprentissage automatique pour évaluer la performance d'un modèle de prédiction. Elle permet de visualiser les prédictions du modèle par rapport aux valeurs réelles. Dans ce cas-ci la matrice de prédiction possède la forme suivante :

		Predicted				
		M1	M2	M3	...	M12
Predictor	M1	M1 measured	M1 predicts M2			
	M2	M2 predicts M1	M2 measured			
	M3			M3 measured		
	
	M12					M12 measured

Tableau 1 : Cross-Prediction Matrix for wind speed

L'utilisation de Meteodyn peut alors apporter des avantages significatifs tels qu'une réduction des coûts due à des investissements moindres dans les mâts de mesure ou bien une estimation financière plus fine due à la baisse d'incertitude sur le P75 et P90. Cette conclusion provient de l'étude comparative réalisée par la société Hatch. Ils ont mené le comparatif sur un site avec 12 mâts de mesures [10], en comparant les résultats grâce à des matrices de confusion. En moyenne, Meteodyn réduit l'erreur de prédiction de 35%. Ainsi, ils ont conclu qu'avec moins de mât et l'utilisation de la CFD, on pouvait obtenir la même précision, voire une précision accrue, qu'avec plus de mât et la méthode

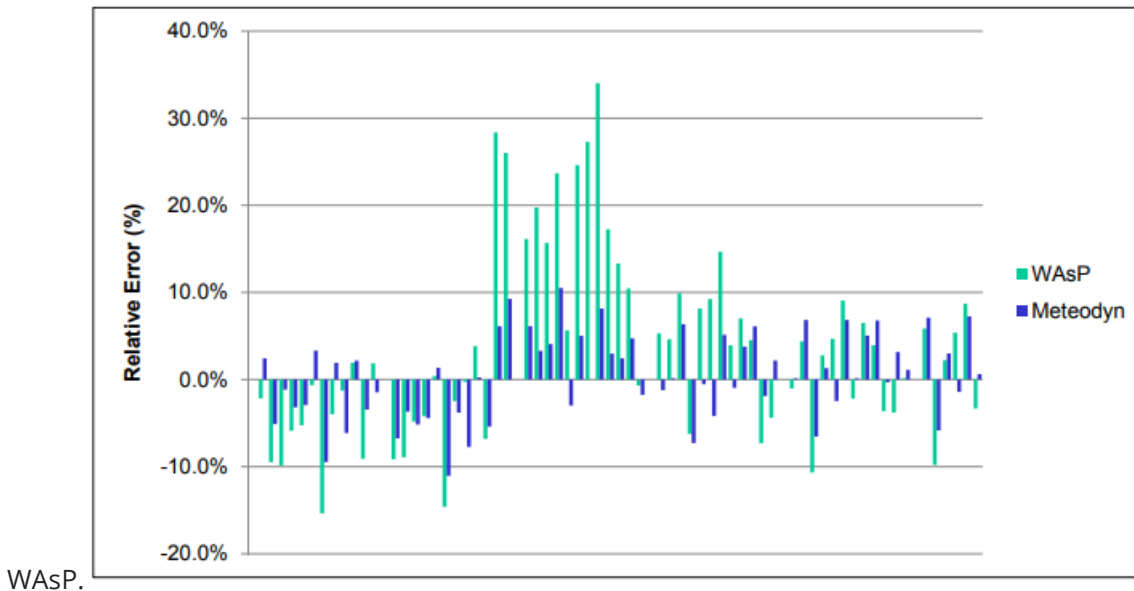


Figure 3 : Relative error for wind speed with Meteodyn and WAsP

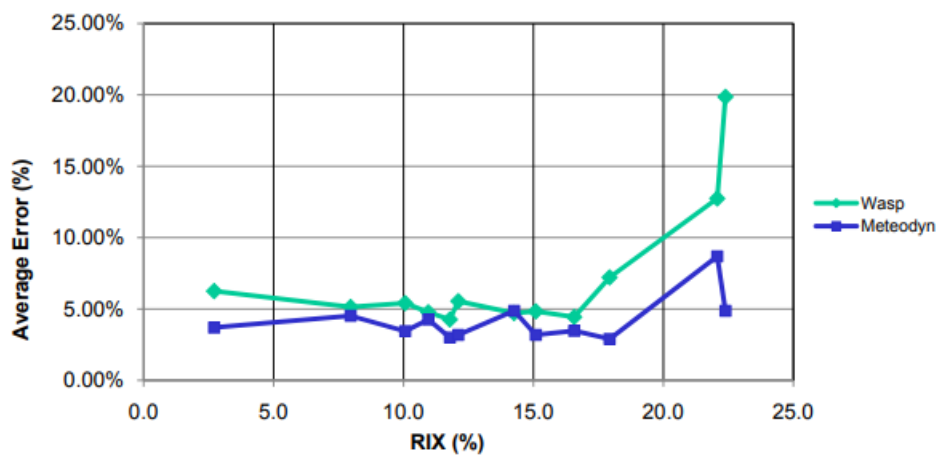


Figure 4 : RIX influence on cross-prediction errors

Les tests de EDF Renouvelables sont réalisés sur un terrain de 1600 km² en Afrique du Sud avec une complexité importante [11]. Les mesures de références sont réalisées à l'aide de 11 mâts de mesures. Les données d'orographie et de rugosité sont similaires sur les deux sites. La simulation sur Meteodyn a été effectuée avec une résolution horizontale de 50 m. Les calculs ont été effectués avec dix-huit directions de vent pour une classe de stabilité thermique neutre. Globalement, l'exécution de la CFD sur ce site donne de bien meilleurs résultats en termes de modélisation du flux, tout en n'ajoutant que

quelques heures de temps de calcul. L'incertitude attendue de la vitesse du vent due à la modélisation du flux a été réduite à environ 2,5% au lieu de 3,5% avec la méthode WAsP (**soit une réduction de l'erreur d'environ 30%**).

Un comparatif de Megajoule est plus nuancé quant à l'efficacité de Meteodyn par rapport à celle de WAsP [12]. En effet le test a été effectué sur 7 sites différents avec des complexités différentes (différents RIX). On observe malgré tout dans la plupart des cas à fort RIX une meilleure estimation de la part de Meteodyn. Cependant selon cette étude les erreurs restent significatives dans les deux cas et les différences entre les deux modèles restent trop faibles et aléatoires pour conclure définitivement sur les performances des deux modèles.

Les comparatifs entre WAsP et Meteodyn ont montré que Meteodyn offre de meilleures performances dans les terrains complexes. Des tests réalisés par différentes entreprises ont démontré une réduction des erreurs par rapport aux mesures et une moindre dépendance à la complexité du terrain avec Meteodyn. Cela permet de réduire les coûts liés aux mâts de mesure et d'améliorer l'estimation financière. Les tests effectués par EDF Renouvelables sur un terrain en Afrique du Sud ont montré que Meteodyn donne de meilleurs résultats avec une réduction de l'incertitude de la vitesse du vent. Bien que les résultats d'une étude de Megajoule soient plus nuancés, Meteodyn a généralement montré une meilleure estimation dans les terrains complexe.

2.3 Conclusion

L'étude bibliographique met en évidence la différence entre les méthodes de CFD et les méthodes classiques (tel que WAsP) dans le domaine de l'ingénierie éolienne. Alors que le modèle classique extrapole les données de vent à une hauteur en utilisant les données de terrain par secteur, la CFD modélise l'écoulement du vent à l'aide des équations de Navier-Stokes. Nous avons également souligné les différences de précision entre ces deux méthodes ainsi que leurs domaines d'utilisation principaux. **On observe dans la grande majorité des cas une meilleure précision pour la CFD lorsque le terrain est complexe** (RIX élevé et Δ RIX élevé entre le mât et les éoliennes). Cela a pour avantages de pouvoir **réduire le nombre de mât de mesures nécessaires** pour des grands sites. En effet l'incertitude lors de l'utilisation de la CFD est moins dépendante du RIX, ainsi les mâts peuvent être plus éloignés et ceux même en terrain complexe. De plus la CFD permet **de réduire l'incertitude sur les prédictions financières d'un projet**. La CFD offre donc **une précision supérieure par rapport aux méthodes traditionnelles, en prenant en compte de manière précise les effets de la turbulence, de la rugosité du sol et de la topographie locale**. Cependant, son utilisation nécessite des ressources de calcul importantes et la **qualité des données d'entrée joue un rôle crucial dans la précision des résultats**. Il est important de reconnaître **les limites de la CFD**, notamment la subjectivité introduite par le **choix des paramètres** et modèles, ainsi que **l'incertitude** associée aux résultats. Des études supplémentaires et des validations sont nécessaires pour améliorer la confiance dans les prédictions obtenues par la CFD en ingénierie éolienne.

Dans ce contexte, la **suite de ce rapport compare les trois méthodes ensembles, ce qui, à notre connaissance, n'a pas été réalisé sur un même site**. De plus il se concentre sur un territoire français plutôt complexe en termes de topographie, le Puy de Dôme.



3 Partie expérimentale - Comparaison WAsP, WAsP-CFD et Meteodyn

3.1 Méthodologie

3.1.1 Définition du terrain à l'étude

Les sites utilisés sont situés à 4 km environ l'un de l'autre. Les RIX des sites sont de 1,95 %¹ pour le mât de mesures de premier et 3,75 % pour le second. Situés dans le Puy-de-Dôme, les deux sites ont une différence d'altitude d'environ 100 m et sont séparés par une vallée. Un puy se trouve à l'ouest du site. L'ensemble de ces particularités permettent de juger ce site comme complexe : les régimes de vents s'y trouvant sont atypiques car fortement influencés par le relief et la modélisation du potentiel éolien y est donc plus complexe.

3.1.2 Logiciels utilisés et conditions de calculs

Trois méthodes de calculs seront comparées : WASP « classique », WASP-CFD et Meteodyn.

3.1.3 Calculs réalisés

3.1.3.1 Données d'entrées

Dans chaque cas les données d'entrée « terrain » sont, pour la CFD :

- données de rugosité Corine Land Cover 2018 affiné autour du site (environ 3 km) ;
- données de topographie avec la précision suivante :
 - RGE Alti 5 m sur 10 km x 10 km ;
 - étendue par BD Alti 25 m interpolé à 5 m sur 16 km x 16 km ;
 - étendues par BD Alti 25 m interpolé à 10 m sur 45 km x 45 km.

Les données de vent d'entrée sont :

- données du mât de mesures du site 1 sur la période 2019-2020 à 100 m (anémomètre) ;
- données du mât de mesures du site 2 sur la période de 2022 à 100 m (anémomètre).

Les données de comparaisons sont :

- données du mât de mesures du site 1 extrapolées long-terme par la méthode MCP (réseau neuronal avec la réanalyse EMD-WRF+ la plus proche) sur la période 2022 ;
- données du mât de mesures du site 2 extrapolées long-terme par la méthode MCP (réseau neuronal avec la réanalyse EMD-WRF+ la plus proche) sur la période 2019-2020.

3.1.3.2 Dalles CFD - paramétrage

Les dalles CFD sont prises identiques pour les deux méthodes. Celles-ci sont situées autour des sites et comprennent les mâts de mesures à l'étude.

Dans un premier temps, les dalles d'accélération CFD sont calculés par Meteodyn et WindPRO. Un pas de 20 m a été pris sur l'emprise des dalles.

¹ I.e. autour de la zone il y a 1,95% de surface supérieure à une pente de 40 %

3.1.3.3 Calculs réalisés

La méthode Scaler de WindPRO permet de transposer les données du mât de mesures du site 1 vers celui du site 2, et vice versa. Ces résultats sont comparés avec les données MCP de chaque mât. Ces vitesses de vent sont aussi comparées à la transposition sans CFD, ie. avec la méthode WAsP « classique ».

Enfin via le module PARK de WindPRO, le productible d'une éolienne à 100 m (N131 3 MW) située à l'emplacement de chaque mât de mesures est calculé. L'éolienne E1 est située au site 2 et l'éolienne E2 au site 1. Les trois méthodes sont utilisées pour calculer les productibles du site 2 à partir des données du site 1 et vice-versa. Les résultats sont comparés au productible obtenu avec le mât de mesures le plus proche.

3.2 Résultats

3.2.1 Vitesses de vent

3.2.1.1 Site 1 vers site 2

	Vitesse de vent (m/s)	Vitesse de vent (m/s)	% avec mât de mesures	Vitesse de vent (m/s)	% avec mât de mesures	Vitesse de vent (m/s)	% avec mât de mesures
Données d'entrée	Site2 2019-2020 (MCP)	Site1 Scaler 2019-2020	-	Site 1 Scaler 2019-2020		Site 1 Scaler 2019-2020	-
Méthode	-	WAsP CFD		Meteodyn		WAsP classique	
Janvier	5,15	4,06	-21,2%	4,08	-20,8%	4,02	-21,9%
Février	6,57	5,78	-12,0%	5,87	-10,7%	5,73	-12,8%
Mars	5,46	4,83	-11,5%	4,97	-9,0%	4,8	-12,1%
Avril	4,38	3,93	-10,3%	3,99	-8,9%	3,9	-11,0%
Mai	4,95	4,29	-13,3%	4,49	-9,3%	4,26	-13,9%
Juin	4,71	4,48	-4,9%	4,59	-2,5%	4,46	-5,3%
Juillet	4,55	4,82	5,9%	5,02	10,3%	4,82	5,9%
Août	4,38	3,78	-13,7%	3,88	-11,4%	3,77	-13,9%
Septembre	5,05	4,52	-10,5%	4,66	-7,7%	4,47	-11,5%
Octobre	5,31	4,44	-16,4%	4,45	-16,2%	4,4	-17,1%
Novembre	5,73	5,03	-12,2%	5,03	-12,2%	4,97	-13,3%
Décembre	6,9	6,18	-10,4%	6,23	-9,7%	6,15	-10,9%
Moyenne	5,34	4,68	-12,4%	4,77	-10,7%	4,65	-12,9%

Tableau 2 : Vitesses de vent au niveau du mât de mesures du site 2 via méthode WAsP CFD, Meteodyn et WAsP classique

3.2.1.2 Site 2 vers site 1

	Vitesse de vent (m/s)	Vitesse de vent (m/s)	% avec mâât de mesures	Vitesse de vent (m/s)	% avec mâât de mesures	Vitesse de vent (m/s)	% avec mâât de mesures
Données d'entrée	Site 1 2022-2023 (MCP)	Site 2 Scaler 2022-2023	-	Site 2 Scaler 2022-2023	-	Site 2 (WAsP classique)	-
Méthode	-	WAsP CFD		Meteodyn		WAsP classique	
Janvier	5,31	6,02	13,4%	5,87	10,5%	6,11	15,1%
Février	5,14	5,69	10,7%	5,55	8,0%	5,74	11,7%
Mars	4,53	5,13	13,2%	5,13	13,2%	5,22	15,2%
Avril	4,81	5,55	15,4%	5,37	11,6%	5,62	16,8%
Mai	4,07	4,37	7,4%	4,22	3,7%	4,44	9,1%
Juin	3,79	4,35	14,8%	4,25	12,1%	4,4	16,1%
Juillet	3,88	4,33	11,6%	4,14	6,7%	4,39	13,1%
Août	3,73	4,2	12,6%	4,03	8,0%	4,26	14,2%
Septembre	3,84	4,33	12,8%	4,22	9,9%	4,39	14,3%
Octobre	3,84	4,69	22,1%	4,71	22,7%	4,79	24,7%
Novembre	4,47	5,3	18,6%	5,24	17,2%	5,38	20,4%
Décembre	4,09	4,96	21,3%	4,78	16,9%	4,88	19,3%
Moyenne	4,29	4,91	14,4%	4,79	11,7%	4,97	15,8%

Tableau 3 : Vitesses de vent au niveau du mâât de mesures du site 1 via méthode WAsP CFD, Meteodyn et WAsP classique

3.2.2 Productible

3.2.2.1 Site 1 vers site 2

Production brute (MWh)	Site 2 MCP 19/20	Site 1 WAsP CFD	Ecart	Site 1 Meteodyn	Ecart	Site 1 WAsP	Ecart
E1	6370,8	5363	-15,8%	5748,2	-9,8%	5281	-17,1%

Tableau 4 : Productible en fonction des données d'entrée et de la méthode utilisée

3.2.2.2 Site 2 vers site 1

Production brute (MWh)	Site 122/23	Site 2 WAsP CFD	Ecart	Site 1 Meteodyn	Ecart	Site 2 WAsP	Ecart
E2	4729,9	5723,9	21,0%	5501,3	16,3%	5918,7	25,1%

Tableau 5 : Productible en fonction des données d'entrée et de la méthode utilisée

3.3 Discussion et conclusion

Aussi bien pour les vitesses de vent et les productibles, la méthode WASP classique est la moins performante. Ensuite vient la méthode WASP-CFD qui permet de gagner 0,5 % à 1,4 % de précision sur la vitesse de vent. Enfin Meteodyn permet un gain 2,2 % à 4,1 %.

On observe une surestimation du productible dans le sens Site 2 -> Site 1 et une sous-estimation dans l'autre sens. Il est donc probable que cela soit dû à la différence de 75 m entre les deux mâts (Site 2 500 m et Site 1 425 m).

La méthode CFD, aussi bien WASP-CFD et Meteodyn, semblent apporter une meilleure précision dans les terrains complexes et si le mât de mesures est éloigné de l'éolienne. Cependant l'erreur engendrée reste importante. L'ajout d'un mât de mesures sur chaque site était donc nécessaire afin d'apprécier au mieux leurs potentiels éoliens.



4 Tableaux - Figures - Cartes

Tableau 1 : Cross-Prediction Matrix for wind speed	13
Tableau 2 : Vitesses de vent au niveau du mât de mesures du site 2 via méthode WAsP CFD, Meteodyn et WAsP classique.....	18
Tableau 3 : Vitesses de vent au niveau du mât de mesures du site 1 via méthode WAsP CFD, Meteodyn et WAsP classique.....	19
Tableau 4 : Productible en fonction des données d'entrée et de la méthode utilisée.....	19
Tableau 5 : Productible en fonction des données d'entrée et de la méthode utilisée.....	19

Figure 1 : Erreur de prédiction de la vitesse du vent WAsP en fonction de la différence d'étendue des pentes raides (valeurs RIX) entre le site prédit et le site de référence. Les données de 5 sites portugais et de 2 sites sont présentées.	9
Figure 2 : Erreur de prévision de la vitesse du vent WAsP en fonction de la différence d'étendue des pentes raides (valeurs RIX) du site prédicteur (référence) et du site prédit les plus accidentés.	10
Figure 3 : Relative error for wind speed with Meteodyn and WAsP.....	14
Figure 4 : RIX influence on cross-prediction errors	14



5 Bibliographie



- [1] Encis ENVIRONNEMENT, 2019. Calcul du potentiel éolien et analyse du productible d'un parc éolien et analyse du productible d'un parc éolien à partir de données de vent et des logiciels de modélisation WAsP et WindPRO
- [2] Bénédicte JOURDIER, 2015. Ressource éolienne en France métropolitaine : méthodes d'évaluation du potentiel, variabilité et tendances.
- [3] Mortensen, Niels Gylling; Petersen, E.L. 1998. Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modelling in complex terrain
- [4] N.Stergiannis, C.Lacor, J.V.Beeck, R.Donnely. 2016. CFD modelling approaches against single wind turbine wake measurements using RANS
- [5] J.Franke, 2004. Recommendations on the use of CFD in wind engineering
- [6] Jonathon Sumner, Christophe Sibuet Watters and Christian Masso, 2010. CFD in Wind Energy: The virtual, multiscale wind tunnel
- [7] Rezaeiha Abdolrahim, Hamid Montazeri, Bert Blocken, 2019. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines
- [8] Matias Avila, Abel Gargallo-Peiro and Arnau Folch, 2017. A CFD Framework for offshore and onshore wind farm simulation
- [9] Lasse Svenningsen, 2013. WAsP-CFD Validation Report
- [10] Gilles Boesch, Hatch, 2011. Validation and Comparison between WAsP and Meteodyn Predictions for a Project in Complex Terrain
- [11] Paul Blondel, EDF Renouvelables, 2020. Comparison of linear and CFD wind modelling on a complex South African site, with regards to levels of uncertainty
- [12] Rui Pereira, Ricardo Guedes, C.Silva Santos, 2010. Comparing WAsP and CFD wind resource estimates for the "regular" user.